بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی سازهٔ ترکیبی کالورت دایره‌ای-سرریز لبه‌پهن*

منوچهر اسمعیلوندی[۱] مهدی اسدی آقبلاغی[۲]

چکیده در این مقاله به بررسی ویژگی‌های هیدرولیکی جریان عبوری از درون یک سیستم مرکب کالورت دایره‌ای-سرریز به‌صورت آزمایشگاهی برای ۱۲ مدل پرداخته شد. منحنی دبی اشل برای مدل‌های مختلف ارائه شد. نتایج نشان داد که به ازای یک هد مشخص دبی سازه ترکیبی بیشتر از مجموع دبی کالورت و دبی سرریز بود. همچنین، ضریب دبی برای سازهٔ ترکیبی بین ۰/۲۵ تا ۰/۷۳، برای سرریز بین ۰/۲۵ تا ۰/۶۳ و برای کالورت ۰/۳۳ تا ۰/۷۷ تغییر می‌کرد. پارامتر بدون بعد H/D (هد به قطر) بیشترین تأثیر را بر روی ضریب دبی داشته است. علاوه‌براین، معادلات رگرسیونی برای تخمین ضریب دبی ارائه شدند.

واژه‌های کلیدی آنالیز ابعادی، اندازه‌گیری دبی جریان، رگرسیون خطی، معادله دبی، منحنی دبی-اشل.

Experimental Study of Discharge Coefficient of Broad Crest Weir-Circular Culvert Combined Structure

M. Esmayilvandi M. Asadi-Aghbolaghi

Abstract *In this research, the hydraulic characteristics of flow through circular culverts and over broad crested weir are experimentally investigated for 12 models. Stage discharge rating curve was presented for each model. The results show that for a specific head, the discharge of combined structure is greater than the summation of discharge of weir and culvert. Also, the discharge coefficient for the combined structure is varying from 0.25 to 0.73 and for the weir is varying from 0.25 to 0.63 and for the culvert is varying from 0.33 to 0.77. The dimensionless parameter H/D (head to diameter) has the greater influence on discharge coefficient. In addition, regression equations are presented for estimation of discharge coefficient.*

Key Words Dimensional Analysis, Discharge Equation, Flow discharge measurement, Linear regression, Stage discharge rating curve.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۶/۵/۱۷ و تاریخ پذیرش آن ۹۶/۱۱/٤ می‌باشد.

(۱) کارشناس ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

(۲) نویسندهٔ مسئول، عضو هیأت علمی گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد. **Email:** mahdi.asadi.a@gmail.com

مقدمه

ازآنجایی‌که برای عبور آب از زیر جاده‌های درجهٔ دو و سه، از زیرگذر (کالورت) استفاده می‌شود، در هنگام بارندگی‌های شدید در سیل‌های با دورهٔ بازگشت بالا کالورت قادر به انتقال همهٔ آب جمع شده در زیر جاده نخواهد بود و ازآنجایی که به‌کارگرفتن یک کالورت بزرگ‌تر یا چند کالورت، برای این چنین مواردی از نظر اقتصادی مقرون‌به صرفه نیست، لذا جاده طوری ساخته می‌شود، که خود جاده به‌صورت یک سرریز عمل می‌کند، آب جمع شده در پشت جاده، می‌تواند پس از عبور از روی جاده به مسیر خود ادامه دهد؛ و پس از فروکش کردن سیل جاده مجدداً قابل استفاده خواهد بود.

از گذشته تا به امروز کالورت‌ها با هدف انتقال آب از زیر جاده‌ها مورد استفادهٔ مهندسین قرار گرفته است و هیدرولیک و ساختار آن همواره مورد بررسی محققین قرار گرفته است. اگرچه کالورت‌ها ظاهراً ساختمان هیدرولیکی ساده‌ای دارند، اما طراحی آن‌ها به دلیل حالت‌های بسیار متنوعی که جریان آب در آن‌ها پیدا می‌کند کار آسانی نیست و به‌سادگی نمی‌توان آن‌ها را به دو دسته جریان‌های سطحی و تحت‌فشار تقسیم‌بندی کرد [1].

چاو ویژگی هیدرولیکی کالورت‌ها را بر اساس پر بودن یا نبودن کالورت‌ها تقسیم‌بندی می‌کنند [2]. دروقاع، الگوهای جریان مختلف بسیاری در کالورت وجود دارد که در طراحی آن‌ها باید عواملی چون شیب، طول، مواد سازنده کالورت، هد آب بالادست، افت ورودی و غیره در نظر گرفته شوند. بیرامی شرایط جریان در کالورت‌ها را به دو دسته تقسیم کرد: اگر شرایط سطح آب در پایین‌دست، شیب کف مجرا و عمق آب در بالادست به نحوی است که جریان در مجرا به‌صورت تحت‌فشار نباشد، عمق بحرانی در مقطع ورودی تشکیل می‌گردد [۳]. این وضعیت را کنترل ورودی می‌نامند. اگر تمام شرایط به نحوی است که کالورت به‌صورت پر عمل می‌نماید این وضعیت را کنترل خروجی می‌گویند. هندرسون برای محاسبه دبی عبوری (Q) از یک کالورت دایره‌ای در شرایطی که جریان به‌صورت $0.8 > \frac{H_1-z_{inlet}}{D} > 0$ و $0.025 < \sin\theta < 0.361$ باشد دبی آن از معادلهٔ:

$$\frac{Q}{D} = 0.432\sqrt{g}\,\frac{(H_1-z_{nlet})^{1.9}}{D^{0.4}} \qquad (۱)$$

و در حالتی که $1.2 > \frac{H_1-z_{inlet}}{D} > 0$ و $0.025 < \sin\theta < 0.361$ باشد دبی از معادلهٔ:

$$\frac{Q}{D} = 0.438\sqrt{g}\ \ (H_1 - z_{inlet})^{1.5} \qquad (۲)$$

محاسبه می‌شوند که در آن D، قطر کالورت و H_1، هد آب بالادست جریان، Z_{inlet}، ارتفاع کف ورودی کالورت، g شتاب ثقل و θ، زاویه شیب کف کالورت است [4].

سرریزها را بر حسب شکل تاج و این‌که آیا تمام یا قسمتی از عرض کانال را گرفته‌اند، تقسیم‌بندی می‌نمایند. در معمول‌ترین تقسیم‌بندی‌ها، سرریزها به دو گروه سرریزهای لبه‌تیز و سرریزهای لبه‌پهن تقسیم می‌شوند. ژئوس و همکاران آزمایش‌هایی برای مطالعه اثر عرض پایین و ارتفاع پایینی یک سرریز مستطیلی مرکب لبه‌پهن بر روی ضریب دبی انجام دادند [5]. برای این منظور، آن‌ها ۹ مدل سرریز لبه‌پهن مستطیلی مرکب را با دبی‌های مختلف آزمایش کردند. آن‌ها اثر پارامترهای مدل را بر روی ضریب دبی بررسی کردند و همچنین نتایج تحقیق آنان با تحقیقات پیشین که بر روی سرریز مستطیلی ساده انجام شده بود، مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که عرض و ارتفاع پایین سرریز تأثیر بسزایی بر روی ضریب دبی دارد و با افزایش آن‌ها، دبی زیادتر می‌شود. عظیمی و همکاران با انجام آزمایش‌هایی مقدار ضریب دبی را برای یک سرریز در یک کانال باز با طول تاج محدود و تاج شیب‌دار و با رمپ بالادست یا پایین‌دست به دست آوردند. آنها با استفاده از معادله سرریز لبه‌پهن و دنبال کردن مطالعاتی که اخیراً بر روی سرریز لبه‌پهن انجام شده است، با

ا ستفاده از نتایج آزمای‌شگاهی یک همب‌ستگی قوی برای ضـــریب دبی ارائه دادند [6]. مهری و همکاران [۷] با استفاده از سامانهٔ استنتاج فازی و مدل فازی-عصبی و با انجام مطالعات آزمایشـــگاهی و تحلیلی ضـــریب دبی سرریزهای لبه‌تیز و لبه‌پهن م ستطیلی را برر سی کردند. آنها عنوان کردند که دو مدل ذکرشـــده، با دقت خوبی ضریب دبی را برآورد می‌کند.

آکسوی و دوقان [8] به‌صورت آزمایشگاهی زاویهٔ رسیدن جریان بر روی دبی یک سرریز لبه‌پهن بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که ضریب دبی علاوه بر طول سرریز تابعی از زاویه رسیدن جریان است و یک رابطه بدون بعد برای ضریب دبی ارائه کردند. سویدان و همکاران [9] به‌صورت آزمایشگاهی و عددی اثر تلاطم جریان اطراف یک سرریز استوانه‌ای که در یک فاصله از بستر قرارگرفته است بررسی کردند. آنها معادلات حاکمه دو بعدی جریان متلاطم را با ANSYS Fluent حل کردند. آنها نتایج عددی را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند که نتایج دو روش تطابق خوبی با هم نشان داد. ادریس و همکاران [10] ضریب دبی سرریز کنگره‌ای ذوزنقه‌ای را بر روی پانزده مدل فیزیکی بررسی کردند. نتایج مطالعهٔ آنها نشان داد که ضریب دبی ابتدا با افزایش هد افزایش پیدا می‌کند و پس‌ازاینکه هد به یک مقدار معین رسید با افزایش هد ضریب دبی کاهش پیدا می‌کند.

گروهی از محققین در تحقیقات خود به م طالعهٔ جریان در ســـازه‌های ترکیبی (جریان روگذر و جریان درون‌گذر) پرداخته‌اند و برای این سازهٔ ترکیبی ضریب دبی ارا ئه نموده‌ا ند. مســـعود یان و همـکاران [۱۱] به بررســـی آزمایشـــگاهی ضـــریب بدهٔ ســـرریز-دریچه ا ستوانه‌ای پرداختند. نتایج آزمایش ای‌شان ن‌شان داد که ضـــریب دبی ســـازهٔ ترکیبی در محدوده آزمایش‌ها بین ۰/۷۵ و ۱/۰۵ متغیر ا ست و ن‌شان دادند که قطر سازه و بازشـــدگی دریچه بر ضـــریب دبی اثر می‌گذارد؛ و آن‌ها یک رابطه برای ضـــریب دبی با ضـــریب همبســـتگی بالا ارائه کردند.

ســـوری و همکـاران [۱۲ و ۱۳] بـه بررســـی آزمایشـــگاهی موقعیت قرارگیری ســـازهٔ اســـتوانه‌ای در را ستای عمود بر جریان بر روی ضریب دبی عبوری از ســـازه پرداختند. نتایج ایشـــان نشـــان داد که بیشـــترین و کمترین ضریب دبی در سازه‌های سرریز ا ستوانه‌ای و دریچه ا ستوانه‌ای م‌شاهده شده ا ست. همچنین با تبدیل سازه از سرریز-دریچه ا ستوانه‌ای به دریچهٔ ا ستوانه‌ای کاهش ســـریعی در مقادیر پارامترهای بدون بعد نســـبت عمق بالاد ست به قطر سازه و ن‌سبت تفا ضل عمق آب بالاد ست و پایین‌د ست به قطر سازه حا صل می شود که علت آن کاهش میزان پس‌زدگی آب است.

حیدرپور و همکاران [۱٤] خصوصیات هیدرولیکی ســـرریز-دریچه نظیر ضـــریب دبی جریان و پارامترهای مؤثر بر جریان ترکیبی را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آنها معادله‌ای برای ضـــریب دبی ارائه کردند که تطابق خوبی بین داده‌های آزمایشـــگاهی و معادلات ارائه‌شـــده دیده شـــد. نورالهی و همکاران [۱۵] در یک مطالعهٔ آزمایشـــگاهی به بررســـی عملکرد هیدرولیکی دریچـهٔ تلفیقی از دریچـهٔ کشـــویی و دریچـهٔ طبلی پرداختند. نتایج مطالعه ایشـــان نشـــان داد که در دریچه ک‌شویی ا ستوانه‌ای ضریب ف‌شردگی تا نزدیک به یک افزایش می‌یابد. همچنین آن‌ها روابطی برای تشـــخیص شـــرایط جریان آزاد و مســـتغرق در دریچه‌های کشـــویی استوانه‌ای و نیم‌استوانه‌ای ارائه کردند.

با توجه به بررســـی منابع به عمل آمده به نظر می‌رســـد که تحقیقات اندکی در زمینه ســـازه‌های ترکیبی صـــورت گرفته اســـت، لذا ضـــروری اســـت که تحقیقات گسترده‌ای برای این سازه‌ها انجام گیرد. تنها تحقیقی که در این زمینه انجام شده ا ست می‌توان به تحقیق گاون و همکاران [16] اشاره کرد که با مطالعه بر روی یک سازهٔ ترکیبی شامل یک سرریز با کالورت مربعی در یک فلوم ۱۲ متری شیشه‌ای به این مو ضوع پی بردند که ضریب دبی (برای ســـیســـتم مرکب کالورت-ســـرریز) با نســـبت ارتفاع آب در پ‌شت سازهٔ ترکیبی به قطر کالورت رابطهٔ

مستقیم دارد (y/D)، یعنی با افزایش آب پشت بند و یا کاهش قطر کالورت ضریب دبی زیاد می‌شود. آنها همچنین ضریب دبی را برای کالورت به صورت معادلهٔ (۳) و (٤) (به ترتیب رگرسیون خطی و نمایی) ارائه کردند:

$$C_d = 0.44 - 0.384\frac{Y}{L} + 0.098\frac{Y}{D} \tag{۳}$$

$$C_d = 0.275\frac{(\frac{Y}{D})^{0.51}}{(\frac{Y}{L})^{0.239}} \tag{٤}$$

و برای سرریز معادلات (۵) (رگرسیون خطی) و (٦) و (۷) (رگرسیون نمایی) را ارائه کردند [16]:

$$C_d = 0.412 + 0.038\frac{H}{P} - 0.047\frac{H}{b} + 0.273\frac{H}{L} - 0.001\tan(\theta) \tag{۵}$$

برای $\theta = 0$:

$$C_d = 0.553\frac{\left(\frac{H}{P}\right)^{0.05}\left(\frac{H}{b}\right)^{2.621}}{\left(\frac{H}{L}\right)^{2.56}} \tag{٦}$$

و برای $\theta > 0$:

$$C_d = 0.365(\tan\theta)^{0.182}\frac{\left(\frac{H}{P}\right)^{0.07}\left(\frac{H}{b}\right)^{0.136}}{\left(\frac{H}{L}\right)^{0.065}} \tag{۷}$$

و برای سازهٔ ترکیبی معادلات (۸) (رگرسیون خطی) و (۹) و (۱۰) (رگرسیون نمایی) را ارائه کردند [16]:

$$C_d = 0.479 - 1.447\frac{H}{P} - 0.076\frac{H}{b} + 1.021\frac{H}{L} + 1.044\frac{H}{D} - 0.012\tan\theta \tag{۸}$$

برای $\theta = 0$:

$$C_d = 0.832\frac{\left(\frac{H}{P}\right)^{1.265}\left(\frac{H}{L}\right)^{0.771}}{\left(\frac{H}{b}\right)^{0.689}\left(\frac{H}{D}\right)^{1.277}} \tag{۹}$$

و برای $\theta > 0$:

$$C_d = 0.394(\tan\theta)^{0.06}\frac{\left(\frac{H}{b}\right)^{0.018}\left(\frac{H}{L}\right)^{0.092}\left(\frac{H}{D}\right)^{1.272}}{\left(\frac{H}{P}\right)^{1.292}} \tag{۱۰}$$

در این مقاله، ضریب دبی یک سیستم کالورت دایره‌ای- سرریز به صورت آزمایشگاه تحقیق شد، تأثیر پارامترهایی مانند زاویهٔ شیب کناری سرریز (θ)، قطر کالورت (D)، ارتفاع سرریز (P)، عرض کف سرریز (b)، بر روی ضریب دبی سازهٔ ترکیبی بررسی می شود؛ و مقدار ضریب دبی برای هر یک از سازه‌های کالورت، سرریز و سازهٔ ترکیبی سرریز کالورت محاسبه می‌شود.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در یک فلوم مستطیلی آزمایشگاهی با طول ۱۲ متر، عرض و ارتفاع ٤۰ سانتی‌متر واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد انجام گرفت. فلوم دارای یک سرریز مثلثی در انتهای مخزن ابتدایی خود است که با استفاده از این سرریز دبی ورودی به کانال به کمک رابطهٔ زیر قابل محاسبه است:

$$Q = \frac{8}{15}C\left(\sqrt{2g}\right)\left(H^{2.5}.\tan\frac{\alpha}{2}\right) \tag{۱۱}$$

که در آن α زاویهٔ رأس سرریز که این زاویه ۹۰ درجه است و H ارتفاع آب روی سرریز و g ثقل و درنهایت C ضریب دبی ورودی به کانال است که رابطهٔ دبی اشل پس از کالیبره سازی و ساده سازی به صورت معادلهٔ (۱۲) ارائه می‌شود:

$$Q = 1.45H^{2.5} \tag{۱۲}$$

برای اندازه‌گیری عمق جریان نیز از یک کولیس با محدودهٔ دقت ۰/۱ ± میلی‌متر استفاده شد.

برای ساخت قسمت سرریز در مدل‌های ترکیبی سرریز- کالورت، ورق هایی از جنس گالوانیزه با ضخامت ۰/۷۵ میلی‌متر و برای قسمت کالورت در سازه‌های ترکیبی سرریز- کالورت از لوله‌هایی از جنس پی‌وی سی استفاده شده است. آزمایش‌ها در سه حالت مختلف انجام شد، در حالت اول جریان فقط از داخل کالورت عبور می‌کرد و مجرای سرریز بسته شد، در حالت دوم جریان فقط از روی سرریز عبور می‌کرد و

مجرای کالورت بسته شد و در حالت سوم، جریان از سازه ترکیبی کالورت-سرریز عبور می‌کرد.

شکل (۱) مدل سازهٔ ترکیبی کالورت-سرریز (combined culvert-weir) را نشان می‌دهد. این مدل‌ها در قطر (D)، عرض کف (b)، ارتفاع سرریز (P)، زاویهٔ جانبی سرریز (θ)، مختلفی ساخته شدند و هر یک از مدل‌های ترکیبی با Sc نام‌گذاری شده است که به چهار گروه و هر گروه شامل سه مدل می‌باشند (جدول ۱). در تمامی آزمایش‌ها عمق آب ۱۱/۸ و ۳۰/۲ سانتی‌متر، دبی جریان بین ۳/۱۶ و ۴۲/۲۱ لیتر بر ثانیه، D بین ۵ تا ۱۰ سانتیمتر، θ بین ۰ تا ۱۵ درجه، ارتفاع سرریز بین ۷ تا ۱۲ سانتیمتر، عرض کف بین ۱۵ تا ۴۰ سانتیمتر و با طول ثابت ۶۰ سانتی‌متر بوده است.



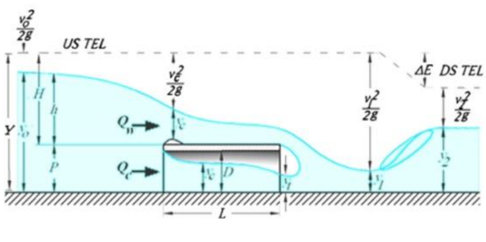
شکل ۱ مدل‌ها و شماتیکی از مدل ترکیبی کالورت–سرریز

جدول ۱ مدل ترکیبی سرریز-کالورت دایره‌ای در ابعاد هندسی مختلف

گروه	مدل	طول سازه (L) (سانتی‌متر)	عرض کف سرریز (b) (سانتی‌متر)	ارتفاع سرریز (P) (سانتی‌متر)	قطر لوله (D) (سانتی‌متر)	زاویه شیب سرریز (θ) (درجه)
	Sc1 (P/D=1.4)	٦٠	٤٠	۷	۵	٠
گروه اول	Sc2 (P/D=1.33)	٦٠	٤٠	۱٠	۷/۵	٠
	Sc3 (P/D=1.2)	٦٠	٤٠	۱۲	۱٠	٠
	Sc4 (P/D=1.4)	٦٠	۱۵	۷	۵	۵
گروه دوم	Sc5 (P/D=1.33)	٦٠	۱۵	۱٠	۷/۵	۵
	Sc6 (P/D=1.2)	٦٠	۱۵	۱۲	۱٠	۵
	Sc7 (P/D=1.4)	٦٠	۱۵	۷	۵	۱٠
گروه سوم	Sc8 (P/D=1.33)	٦٠	۱۵	۱٠	۷/۵	۱٠
	Sc9 (P/D=1.2)	٦٠	۱۵	۱۲	۱٠	۱٠
	Sc10 (P/D=1.4)	٦٠	۱۵	۷	۵	۱۵
گروه چهارم	Sc11 (P/D=1.33)	٦٠	۱۵	۱٠	۷/۵	۱۵
	Sc12 (P/D=1.2)	٦٠	۱۵	۱۲	۱٠	۱۵

جریان در سازهٔ ترکیبی کالورت ـ سرریز

شکل (۲) جریان عبوری از سازهٔ ترکیبی کالورت-سرریز را نشان می‌دهد. در آزمایش‌های انجام‌شده برای (P/D<1.4) اگر جریان عبوری از کالورت مستغرق باشد حتماً جریان در سازهٔ ترکیبی مستغرق است (خواه جریان از روی سرریز در سازهٔ ترکیبی مستغرق باشد یا نباشد). اگر جریان عبوری از روی سرریز و درون کالورت آزاد باشد ممکن است جریان در سازهٔ ترکیبی آزاد یا مستغرق باشد.



شکل ۲ جریان عبوری از سازهٔ ترکیبی کالورت-سرریز [16]

میزان دبی عبوری از روی سازهٔ ترکیبی کالورت-سرریز برابر است با مجموع دبی عبوری از روی کالورت و سرریز به‌صورت جداگانه یعنی:

$$Q_t = Q_c + Q_w \qquad (۱۳)$$

که در آن Q_t دبی عبوری از سازهٔ ترکیبی، Q_c دبی عبوری از کالورت، Q_w دبی عبوری از سرریز است. ازآنجا دبی عبوری از یک کالورت دایره‌ای از معادلهٔ (٤) محاسبه می‌شود [17]:

$$Q_c = C_{dc}\frac{\pi D^2}{4}\times\sqrt{2g\times(Y-y_1)} \qquad (۱٤)$$

که در آن D قطر کالورت، Y بار مؤثر آب نسبت به کف کالورت و y_1 عمق اولیهٔ پرش در پایین‌دست سازه و C_{dc} ضریب دبی است. سهم سرریز در مقدار دبی عبوری از معادلهٔ (۵) محاسبه می‌شود:

$$Q_W = C_{dw}\left(\frac{2}{3}\times b\times H^{\frac{3}{2}}\times\sqrt{2\times g}+\frac{8}{15}\times\tan\theta\times H^{\frac{5}{2}}\times\sqrt{2\times g}\right) \quad (۱۵)$$

که در آن H هد آب بالادســـت و θ زاویه جانبی سرریز و C_{dw} ضریب دبی ا ست؛ و معادلهٔ کلی تئوری برای سازهٔ ترکیبی کالورت-سرریز برابر است با:

$$(Q_t)_{act} = C_d\times\left(\frac{\pi D^2}{4}\times\sqrt{2g\times(Y-y_1)}+\left(\frac{2}{3}\times b\times H^{\frac{3}{2}}\times\sqrt{2\times g}+\frac{8}{15}\times\tan\theta\times H^{\frac{5}{2}}\times\sqrt{2\times g}\right)\right) \quad (۱۶)$$

که در آن C_d ضـریب دبی سـازهٔ ترکیبی اسـت. بر روی ضـــریب دبی ســـازهٔ ترکیبی عواملی چون ارتفاع سرریز (P)، عرض کف سرریز (b)، میزان زاویهٔ کناری سرریز (tanθ)، ارتفاع آب بالاد ست، طول سازهٔ ترکیبی (L)، قطر کالورت (D)، جرم مخصـــوص آب (ρ)، لزجت دینامیکی آب (μ)، کشش سطحی (σ) و نیروی گرانش (g) اثر دارند:

$$\varphi(C_d, P, b, \tan\theta, H, L, D, \rho, g, \sigma, \mu, V) = 0 \quad (۱۷)$$

که با اســـتفاده از آنالیز ابعادی و معادلهٔ باکینگهام به‌صورت بی‌بعد و به شکل زیر بیان می‌گردند:

$$C_d = \varphi\left(\frac{H}{P},\frac{H}{L},\frac{H}{D},\frac{H}{b},\tan\theta, W, R, Fr\right) \quad (۱۸)$$

که در رابطهٔ بالا W عدد وبر ا ست که ن شان‌دهنده نسبت نیروی اینرسی به کشش سطحی است و زمانی که تیغه‌ی آب از ضخامت کافی برخوردار باشد اثر آن ناچیز است و R عدد بدون بعد رینولدز است که بیانگر نسبت نیروی اینرســـی به نیروی لزجت اســـت و برای اعداد رینولدز بزرگ‌تر از ۴۰۰ اثر لزجت ناچیز و برای اعداد بزرگ‌تر از ۱۰۰۰ اثر لزجت به‌طور کامل از بین می‌رود [9]، با توجه به اینکه حداقل عدد رینولدز در این تحقیق ۱۰^۴×۱/۱ اســـت، لذا از اثر لزجت صـــرف‌نظر شـــد. همچنین، درصـــورتی‌که عمق جریان از ۱/۷ ســـانتی‌متر بزرگ‌تر یا عدد وبر بزرگ‌تر از ۱۲ باشـــد می‌توان از اثر لزجت صـــرف‌نظر کرد [18]، با توجه به اینکه حداقل عدد وبر در این تحقیق ۲۵ اســـت، لذا از اثر کشـــش سطحی صرف‌نظر شد؛ و Fr عدد فرود بالاد ست سازه اســـت. لذا از تأثیر آن چشـــم‌پوشـــی می‌گردد. درنتیجه ارتباط بین پارامترهای مؤثر و میزان ضریب دبی عبوری از سازهٔ ترکیبی کالورت-سرریز به دست می‌آید:

$$C_d = \left(\frac{H}{P},\frac{H}{L},\frac{H}{D},\frac{H}{b},\tan\theta, Fr\right) \quad (۱۹)$$

برای کاهش پارمتر های بدون بعد پارمتر ها بر یکدیگر تقسیم شدند، لذا:

$$C_d = \left(\frac{P}{D},\frac{H}{b},\frac{H}{L}\tan\theta, Fr\right) \quad (۲۰)$$

همچنین ضـــریب دبی عبوری از ســـرریز (بدون حضور کالورت) از معادلهٔ (۲۱) به دست می‌آید:

$$C_d = \left(\frac{H}{P},\frac{H}{b},\tan\theta, Fr\right) \quad (۲۱)$$

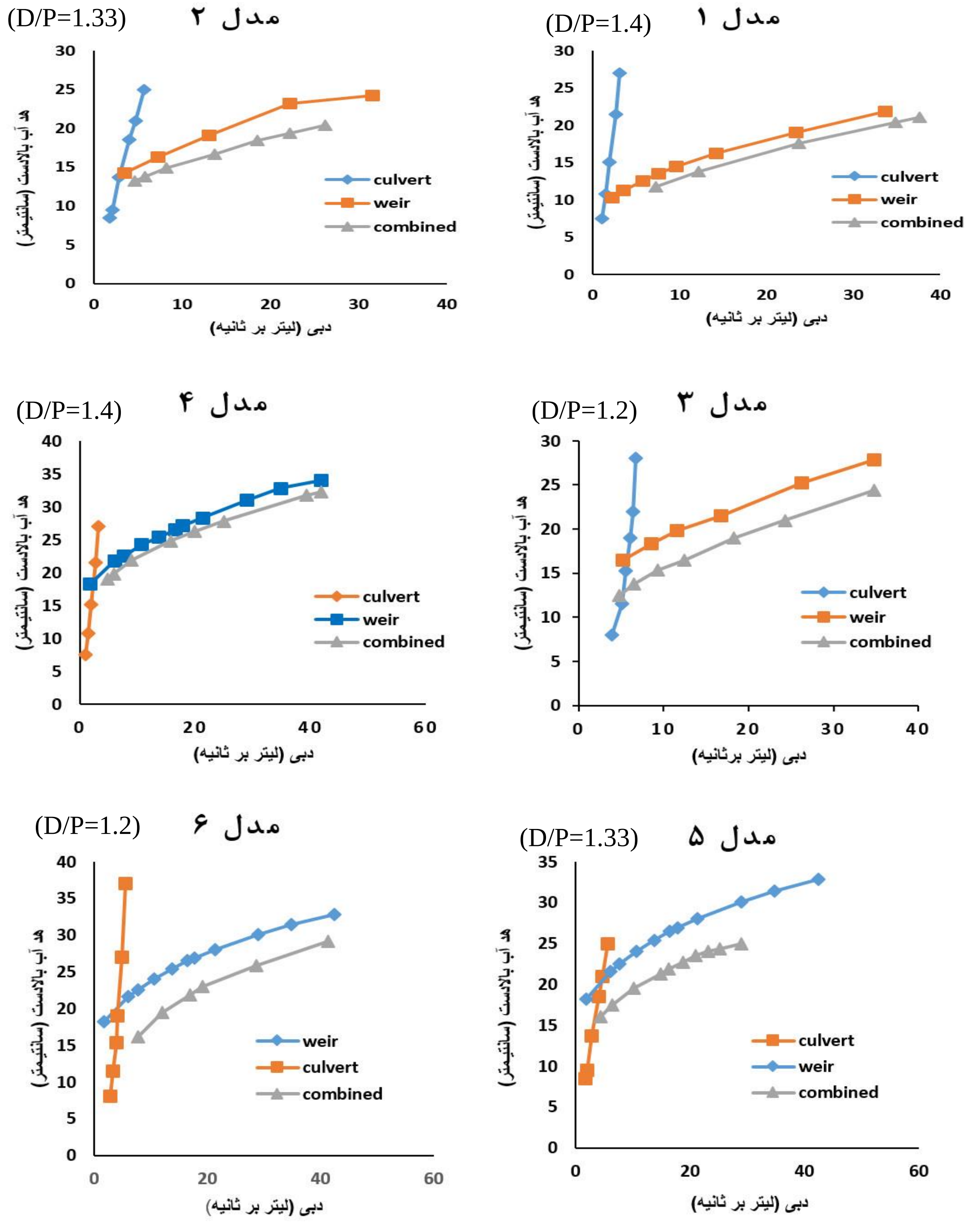
همچنین برای یک کالورت (بدون حضور سرریز) وابســتگی ضــریب دبی در معادلهٔ (۲۲) قابل مشــاهده است:

$$C_d = \left(\frac{y}{D},\frac{y}{L}, Fr\right) \quad (۲۲)$$

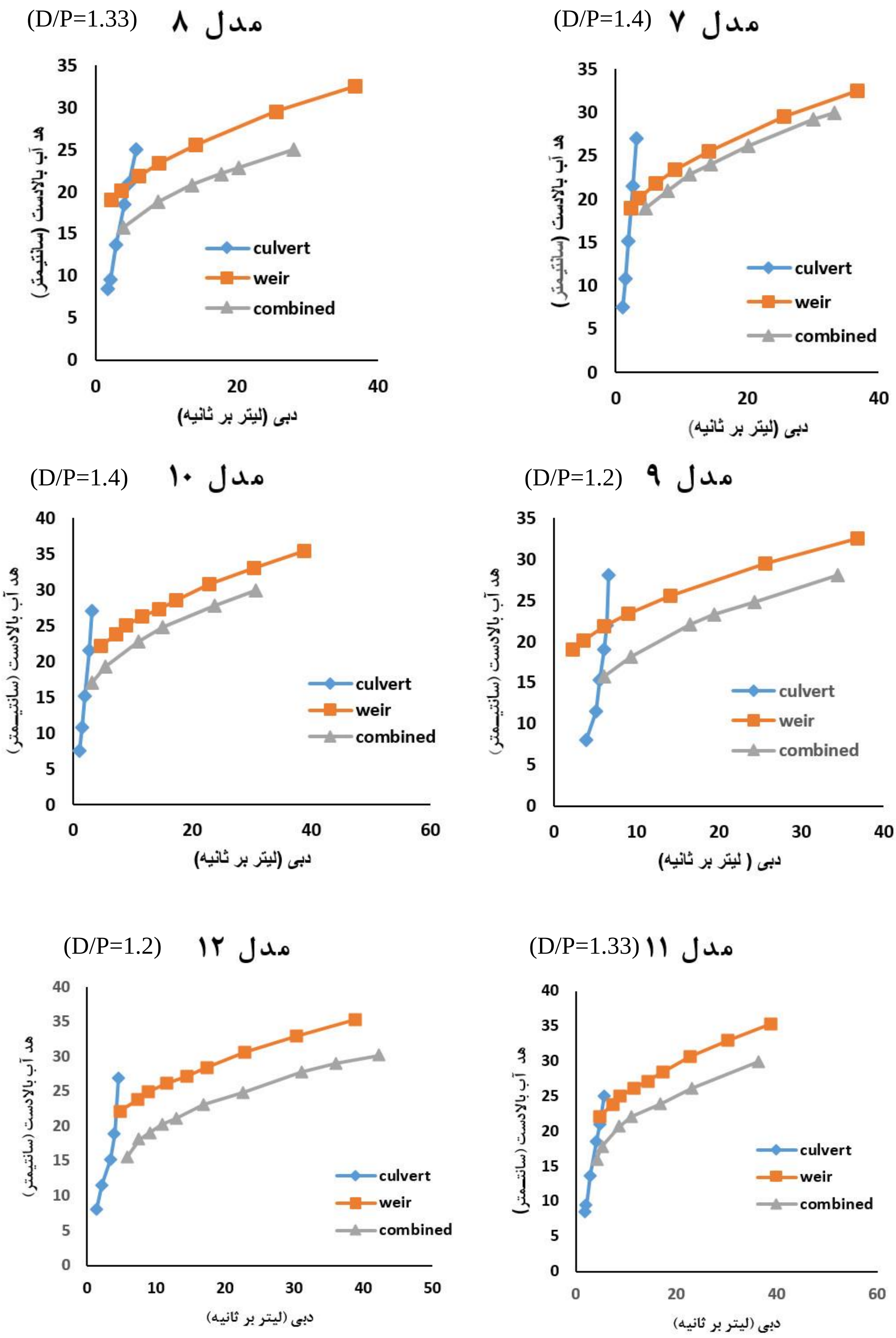
بحث و نتایج

برای هر مدل، به‌طور متوســـط ۱۰ آزمایش در ده دبی مختلف، انجام شد. شایان یادآوری است میزان دبی‌های ورودی به کانال بین ۳ تا ۴۵ لیتر بر ثانیه متغیر بوده است. بدین منظور در این آزمایش بر اساس زاویهٔ کناری سرریز، با قراردن سازهٔ ترکیبی کالورت -سرریز در چهار گروه، رابطهٔ هد-دبی برای ســـازهٔ کالورت-ســـرریز، کالورت و سرریز ترسیم شده است (شکل‌های ۳ و ۴). در تمامی مدل‌ها با افزایش هد آب بالاد ست، میزان دبی عبوری از ســـازهٔ ترکیبی زیاد می‌شـــود. در بعضـــی از مدل‌ها، منحنی دبی-هد ســـازه‌های ســـرریز و کالورت همدیگر را در نقاطی قطع می‌کنند که بیانگر این اســـت درواقع در این هد ثابت دبی عبوری از روی ســـرریز و دبی جریان از داخل کالورت یکسان می‌باشند که در زیر این نقاط به‌ازای یک هد مشـــخص میزان دبی عبوری از داخل کالورت بیشـــتر از ســـرریز و در بالای آن دبی

عبوری از روی سرریز بیشتر از کالورت است. همچنین، برای یک هد مشـــخص دبی ســـازه ترکیبی بزرگ‌تر از مجموع دبی ســـازه کالورت و ســـرریز اســـت. دلیل آن می‌تواند این باشـــد که در ســـازه ترکیبی تنگ‌شـــدگی خطوط جریان و در نتیجه افت انرژی نسبت به عملکرد دو سازه به‌صورت تکی کمتر اتفاق می‌افتد.



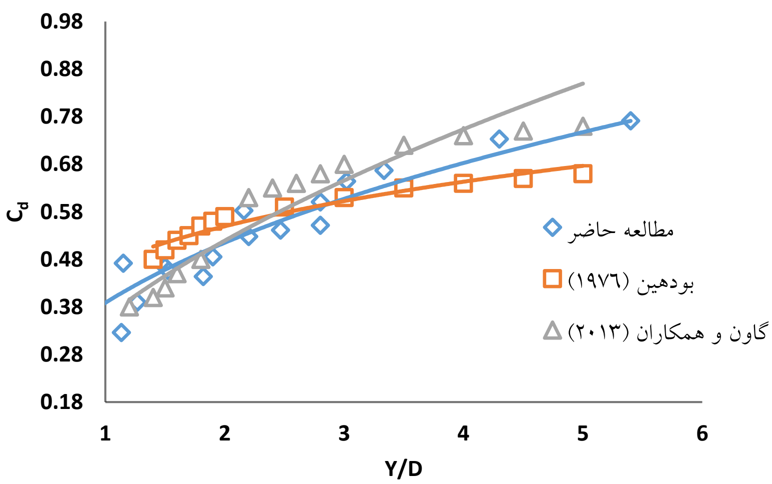
شکل ۳ رابطهٔ دبی-هد برای مدل ۱-٦ (گروه اول و دوم)



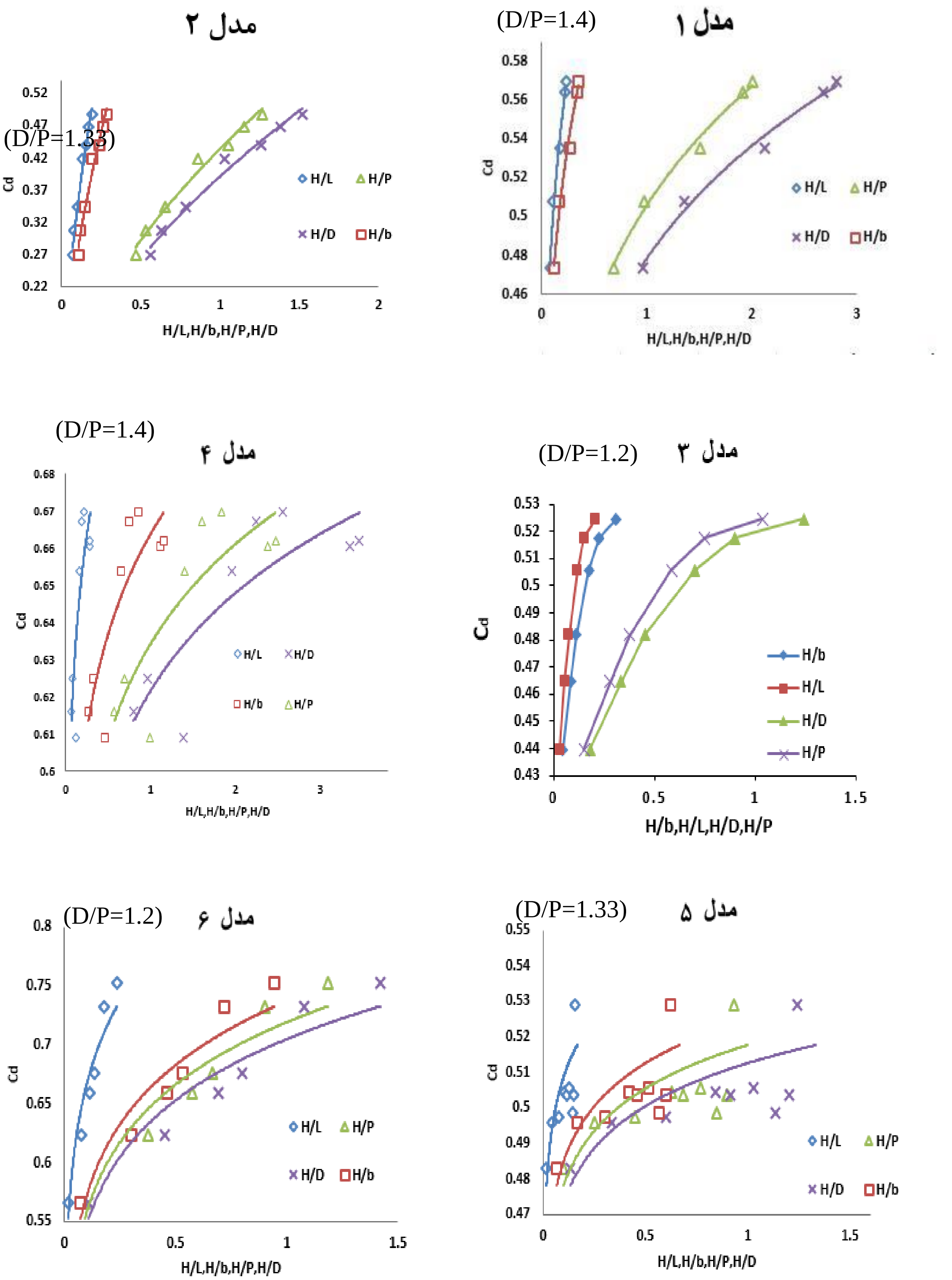
شکل ٤ رابطۀ دبی–هد برای مدل ۷–۱۲ (گروه سوم و چهارم)

شکل (۵) ضریب دبی عبوری از کالورت در برابر نسبت هد آب بالادست جریان در فلوم به قطر کالورت $(\frac{Y}{D})$ برای مطالعه حا ضر، داده‌های بودهین برای کالورت دایره‌ای و گاون و هم‌کاران برای کالورت مربعی در شرایط یکسان در کالورت $(\frac{Y}{D} \geq 1.5, y_4 \leq 1.0)$ را نشان می‌دهد، ه در تمامی مدلها با افزایش نسبت $(\frac{Y}{D})$ ضریب دبی عبوری از کالورت افزایش می‌یابد. شایان ذکر است، مطالعه گاون و همکاران بر روی یک مدل ترکیبی کالورت مربعی–سرریز انجام شده است [8,10].

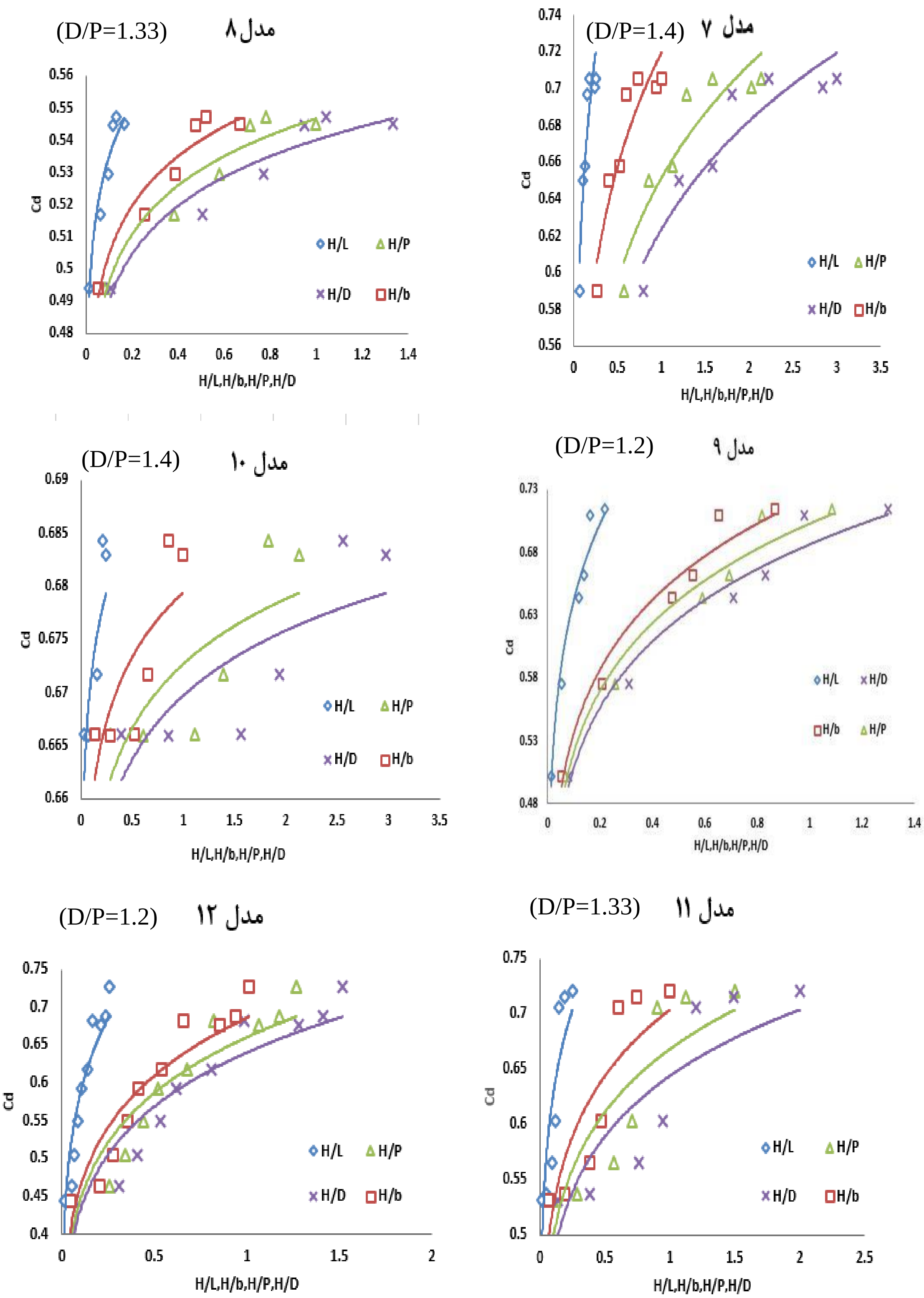
ضریب دبی سازه ترکیبی نسبت به پارامترهای بی‌بعد تأثیرگذار برای مدل‌های مختلف در شکل‌های (٦) و (۷) رسم شده است. نتایج نشان می‌دهد که تمام پارامترهای بدون بعد بر روی ضریب دبی اثر می‌گذارند و با افزایش هرکدام از این پارامترهای بدون بعد ضریب دبی به میزان قابل توجهی افزایش می یابد. در بین این پارمترها دو پارامتر H/L و H/b بیشترین اثر را بر روی ضریب دبی دارند، به‌طوری‌که با افزایش کم آنها مقدار ضریب دبی به میزان قابل توجهی افزایش می یابد. علاوه‌برآن، با افزایش نسبت هد آب بالادست به هر یک از پارامترهای عرض و ارتفاع سرریز و قطر کالورت، در سازهٔ ترکیبی در تمامی مدل‌های ۱ تا ۱۲ ضریب دبی آب عبوری از سازهٔ ترکیبی افزایش می یابد. میزان ضریب دبی برای مدل‌های ۱ تا ۳ در گروه اول بین ۰/۲۷ تا ۰/۵۹ است. میزان ضریب دبی برای مدل‌های ٤ تا ٦ در گروه دوم بین ۰/٤۸ تا ۰/۷۵ و میزان ضریب دبی برای مدل‌های ۷ تا ۹ در گروه سوم بین ۰/٤۸ تا ۰/۷۳ و میزان ضریب دبی برای مدل‌های ۹ تا ۱۲ در گروه چهارم بین ۰/٤ تا ۰/۷٤ را نشان می‌دهد. این شکل‌ها نشان می‌دهند که میزان تغییرات ضریب دبی بین ۰/۲۷ تا ۰/۷۵ است که بیشترین مقدار آن برای مدل ٦ و کمترین مقدار آن برای مدل ۲ م شاهده می شود. در مقایسهٔ مدل‌های هر یک از گروه‌های اول تا چهارم می‌توان مشاهده کرد که با کاهش ارتفاع سرریز ضریب دبی جریان افزایش می‌یابد. در مقایسهٔ گروه اول با گروه دوم می‌توان به تأثیر عرض جریان بر ضریب دبی ا شاره کرد که با کاهش عرض، ضریب دبی زیادتر شده ا ست. در مقایسهٔ گروه دوم با چهارم اثر زاویه جانبی سرریز نشان‌دهندهٔ کاهش ضریب دبی جریان با افزایش زاویهٔ جانبی سرریز است.



شکل ۵ رابطهٔ ضریب دبی با نسبت هد آب بالادست به قطر کالورت با طول ثابت



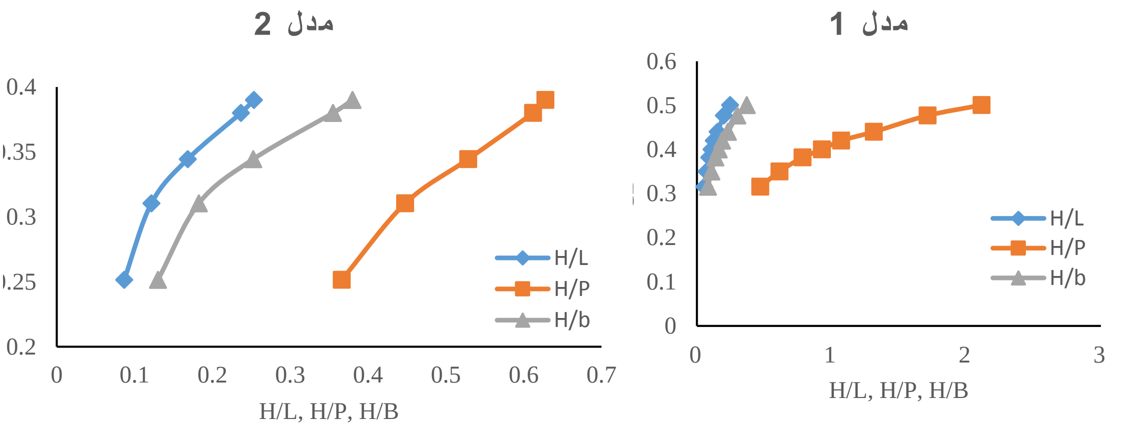
شکل ٦ میزان تغییرات C_d با هریک از H/D، H/P، H/b ، H/L برای مدل‌های ۱-٦ (گروه اول و دوم)



شکل ۷ میزان تغییرات C_d با هریک از H/D ،H/P ،H/b ،H/L برای مدل‌های ٦–١٢ (گروه سوم و چهارم)

همچنین برای هر یک از پارامتر های بی بعد در جدول (۲) در صد تغییرات ضریب دبی برای تمامی ۱۲ مدل سازهٔ ترکیبی به ازای مقدار ۲۰ درصد افزایش برای هر یک از متغیرها بررسی شده است. با توجه به این جدول، میانگین افزایش درصد C_d به ازای افزایش ۲۰ در صدی هر یک از پارامترهای H/D ،H/P ،H/b و H/L این نتیجه حا صل می شود که H/D بیشترین تأثیر را بر روی ضریب دبی دا شته و به ازای افزایش ۲۰ در صدی آن مقدار C_d، ۲/۳۸ درصد افزایش می‌یابد.

شکل (۸) تغییرات C_d را در برابر پارامترهای H/B، H/P و H/L برای سرریز نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است با افزایش هر یک از این پارامترهای بدون بعد ضریب دبی سرریز به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.



شکل ۸ میزان تغییرات C_d با هریک از H/D ،H/P ،H/b و H/L برای سرریز

جدول ۲ آنالیز حساسیت برای هر یک از متغیرهای مستقل

ردیف	مدل	درصد افزایش C_d به ازای افزایش ۲۰ درصدی H/L	درصد افزایش C_d به ازای افزایش ۲۰ درصدی H/P	درصد افزایش C_d به ازای افزایش ۲۰ درصدی H/D	درصد افزایش C_d به ازای افزایش ۲۰ درصدی H/b
۱	SC1	۰/۳۵	۱/۲۶	۲/۹۹	۰/۹۸
۲	SC2	۰/۳۶	۱/۰۶	۲/۴۸	۱/۷۱
۳	SC3	۰/۳۳	۰/۸۳	۱/۷	۰/۸۹
۴	SC4	۰/۲۸	۰/۵۶	۴/۸۹	۲/۴۷
۵	SC5	۰/۳	۰/۵۹	۲/۰۲	۲/۶
۶	SC6	۰/۳	۰/۶	۱/۵۶	۲/۶۶
۷	SC7	۰/۲۸	۰/۵۶	۲/۸۶	۲/۴۷
۸	SC8	۰/۲۹	۰/۵۹	۲/۰۲	۲/۵۹
۹	SC9	۰/۳	۰/۶۱	۱/۵۶	۲/۶۷
۱۰	SC10	۰/۲۸	۰/۵۷	۲/۸۵	۲/۴۶
۱۱	SC11	۰/۲۹	۰/۵۹	۲/۰۲	۲/۶
۱۲	SC12	۰/۳	۰/۶۱	۱/۵۶	۲/۶۶
میانگین		۰/۳۵	۰/۷	۲/۳۸	۲/۲۳

ضریب دبی به‌دست‌آمده برای کالورت

با استفاده از رگرسیون خطی برای کالورت، با میزان ضریب همبستگی $R^2 = 0.89$، معادلهٔ زیر برای ضریب دبی کالورت حاصل می‌شود:

$$C_d = 0.27 + 0.11\frac{y}{D} - 0.049\frac{y}{L} + 0.51Fr \qquad (۲۳)$$

برای این مطالعه جزر میانگین مربعات خطا (RMSE) ۰/۰۳۹۵ و متوسط خطای نسبی ۰/۰۶۱ است. این در حالی است که برای معادلات پیشنهادی گاون [۱۶]، برای کالورت مستطیلی، ۰/۰۶۱ و ۰/۰۵۵ و متوسط خطای نسبی ۰/۰۹۸ و ۰/۰۹۲ است که نشان‌دهنده دقت بالاتر مطالعه حاضر است. دلیل می‌تواند این باشد که در مطالعهٔ حاضر کالورت دایره‌ای است که واضح است رابطهٔ پیشنهادی در این مقاله جواب بهتر می‌دهد.

ضریب دبی به‌دست‌آمده برای سرریز

با استفاده از رگرسیون خطی برای سرریز با میزان ضریب همبستگی $R^2 = 0.88$ باشد:

$$C_d = 0.82 + 0.14Fr + 0.51\frac{H}{P} - 0.71\frac{b}{L} - 0.75\tan\theta \qquad (۲۵)$$

که برای آن مقدار جزر میانگین مربعات خطا ۰/۰۳۶۶ و متوسط خطای نسبی ۰/۰۵۸ که همین مقادیر، به ترتیب، برای مطالعه گاون [۱۶] ۰/۱۲۴ و ۰/۱۹۲ به دست آمد؛ که علت دقت بیشتر مطالعه حاضر در نظر گرفتن عدد فرود بالادست در رگرسیون هست، در صورتی‌که در مطالعه ایشان این پارامتر در نظر گرفته نشده است.

ضریب دبی به‌دست‌آمده برای سازهٔ ترکیبی کالورت – سرریز

با استفاده از رگرسیون خطی برای کالورت- سرریز با میزان ضریب همبستگی $R^2 = 0.71$ در سطح احتمال ۰/۰۵ معنی‌دار باشد:

$$C_d = 0.42 - 0.25Fr + 0.018\frac{P}{D} + 0.21\frac{H}{b} + 0.27\tan\theta + 0.13\frac{H}{L} \qquad (۲۶)$$

که برای داده‌های این مقاله جزر میانگین مربعات خطا ۰/۰۵۹۲ و متوسط خطای نسبی ۰/۰۸۸ که این مقادیر برای مطالعه گاون [۱۶]، به ترتیب، برابر با ۰/۲۶ و متوسط خطای نسبی ۰/۳۵۶ است؛ که همان‌طور که مشخص است، نتایج مطالعهٔ حاضر دقیق‌تر است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق ضریب دبی یک سیستم ترکیبی کالورت–سرریز به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. نتایج نشان داد که ضریب دبی برای سازهٔ ترکیبی بین ۰/۲۵ تا ۰/۷۳، برای سرریز بین ۰/۲۵ تا ۰/۶۳ و برای کالورت ۰/۳۳ تا ۰/۷۷ تغییر می‌کرد. پارامتر بدون بعد H/D (هد به قطر) بیشترین تأثیر را بر روی ضریب دبی داشته است. همچنین، با کاهش شیب جانبی سرریز، ضریب دبی عبوری هم در سازهٔ سرریز و هم در سازهٔ سرریز-کالورت افزایش می‌یابد.

در یک هد ثابت میزان دبی عبوری از سازهٔ ترکیبی کالورت- سرریز از مجموع دبی آب عبوری از روی یک سرریز و داخل یک کالورت بیشتر است، علت آن این است که وقتی هرکدام از سازه‌ها به صورت مجزا عمل می‌کنند تنگ‌شدگی خطوط جریان نسبت به سازهٔ مرکب بیشتر و در نتیجه افت انرژی بیشتر می‌شود، بنابراین دبی سیستم مرکب بزرگ‌تر از مجموع دبی هر یک از دو سازه است. علاوه‌براین، معادلات رگرسیونی برای تخمین ضریب دبی ارائه شدند.

مراجع

1. Meselhe, E.A., and Hebert, K. “Laboratory measurements of flow through culverts”, *Journal of Hydraulic Engineering.* Vol. 133(8), 973-976, (2007).
2. Chow, V.T., “Open Channel Hydraulics”, McGraw-Hill book company, (1959).
3. بیرامی، م.، *سازه‌های انتقال آب.* انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان. ۱۳۸۹. صفحات ۲٤۸ تا ۳٤۷.
4. Henderson, F.M., “Open Channel Flow”, Mac-Millan Pub.co. (1966).
5. Gogus, M., Defne, Z., and Ozkandemir, V., “Broad-crested weirs with rectangular compound cross sections”, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering.* Vol. 132(3), pp. 272–280, (2006).
6. Azimi, A.H., Rajaratnam, N., and Zhu, D.Z., “Discharge characteristics of weirs of finite crest length”, *Journal of Hydraulic Engineering,* Vol. 135 (12), pp. 1081–1085. (2009).
7. مهری، ی.، عباسی، ن.، و ارونقی، ه.، "پیش‌بینی ضریب دبی در سرریز لبه‌پهنو لبه تیز با بهره‌گیری از سامانه استنتاج فازی و فازی-عصبی تطبیقی". تحقیقات منابع آب ایران، ۱۳(۲): صص. ۱٦۸-۱۷٤، (۱۳۹٦).
8. Aksoy, A.O., and Dogan, M., "Experimental investigation of the approach angle effects on the discharge efficiency for broad crested weirs", *Anadolu University Journal of Science and Technology A- Applied Sciences and Engineering,* Vol. 17(2), pp. 279-286, (2016).
9. Soydan, N.G., Şimşek, O., and Aköz, M.S., "Prediction and validation of turbulent flow around a cylindrical weir", European Water, Vol. 57, pp. 85-92, (2017).
10. Idrees, A.K., Al-Ameri, R. Chua, L.H.C., and Das, S., “Determination of discharge coefficient for flow over cycle compound trapezoidal plan from, labyrinth weir”, *International Journal of Civil Engineering and Technology,* Vol. 7(4), pp. 314-328, (2016).
11. مسعودیان، م.، فندرسکی، ر.، قره‌گزلو، م.، "مطالعه ضریب بده‌ی سرریز-دریچه استوانه‌ای و تعیین رابطه‌ای آن با ضریب بده‌ی دریچه‌ی و سرریز جداگانه". مجله مهندسی منابع آب، ٦: صص. ۵۱-٦۲، (۱۳۹۲).
12. سوری، ا.، مسعودیان، م.، کردی، ا.، و راتچر، ک.، "بررسی آزمایشگاهی تغییرات ضریب دبی و افت انرژی در سرریز-دریچه استوانه‌ای با حرکت قائم". نشریه مهندسی عمران و محیط‌زیست، ٤٤(٤): صص. ٦۵-۷۸، (۱۳۹۲).
13. سوری، ا.، مسعودیان، م.، راتچر، ک.، و کردی، ا.، "بررسی آزمایشگاهی موقعیت سازه سرریز-دریچه استوانه‌ای در راستای عمود بر جریان بر روی ضریب دبی جریان". مجله پژوهش آب ایران، ۹(۲): صص. ۳۳-٤۱، (۱۳۹٤).
14. حیدرپور، م.، رضویان، س.ح.، و حسینی، ی.، "تعیین ضریب دبی در مدل ترکیبی سرریز نیم‌دایره‌ای و دریچه کشویی در کانال دایره‌ای". مجله پژوهش آب ایران، ۱۳: صص. ۱٤۹-۱۵۵، (۱۳۹۲).
15. نورالهی، م.، ضیایی، ع.ن.، و بهشتی، ع.ا.، "بررسی آزمایشگاهی مشخصات جریان در دریچه‌های کشویی با لبه استوانه‌ای و نیم استوانه‌ای". نشریهٔ مهندسی عمران فردوسی، جلد ۲۹(۲): صص. ۳۱-٤٦، (۱۳۹٦).
16. Guven, A., Hassan, M., and Sabir, S.H., “Experimental investigation on discharge coefficient for a combined broad crested weir-box culvert structure”, *Journal of Hydrology,* Vol. 500, pp. 97-103, (2013).
17. Novak, P., Guinot, V. Jeffrey, A. and Reeve, D.E., “Hydraulic Modelling – an Introduction, Principles,

methods and applications", Taylor & Francis, (2010).

18. Bodhaine, G.L., "Measurment of peak discharges at culverts by indirect methods", Government Printing Office, US Geological Survey, Washington (DC), (1976).